

УДК 515.18 + 621.372.542

В.М. КОРЧИНСКИЙ, Д.Н. СВИНАРЕНКО  
Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

### **ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО И РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

*Предложен метод повышения пространственного и радиометрического разрешения цифровых изображений дистанционного зондирования, зафиксированных в произвольном количестве спектральных интервалов излучения – носителя видовой информации. Метод базируется на использовании аналитических сигналов, соответствующих функциям распределения яркости изображений спектральных каналов. Показано, что сопряженные по Гильберту составляющие аналитических сигналов, ортогональные функциям распределения яркости изображений спектральных каналов, обладают расширенным диапазоном распределений уровней яркости. На основе анализа аналитических сигналов, представляющих распределения яркости цифровых изображений, зафиксированных в различных спектральных каналах, предложен способ включения в распределения яркости изображений этих каналов компонент с более высокой, чем исходная линейной разрешающей способностью при сохранении спектральной информации. Реализация предлагаемого метода включает следующие этапы: попарную ортогонализацию распределений яркости изображений спектральных каналов; построение аналитических сигналов для каждой ортогонализированной спектральной компоненты зафиксированного многоспектрального изображения; замену сопряженных по Гильберту составляющих аналитических сигналов изображений спектральных компонент соответствующей составляющей изображения спектрального канала с максимальным пространственным разрешением. Реконструкция распределений яркости синтезированных указанным образом изображений выполняется посредством последовательного применения обратного преобразования Гильберта сформированных сопряженных компонент аналитических сигналов и преобразования, обратного по отношению к использованному алгоритму ортогонализации распределений яркости изображений спектральных каналов. В качестве количественной меры пространственного разрешения использована энергетическая энтропия распределений яркости. Показано, что предлагаемый метод обеспечивает сохранение структурной схожести функций распределения яркости исходных и синтезированных изображений спектральных каналов.*

*Ключевые слова: многоспектральное изображение; пространственное разрешение; радиометрическое разрешение; ортогонализация; аналитический сигнал; преобразование Гильберта; индекс структурной схожести.*

В.М.КОРЧИНСЬКИЙ, Д.М.СВИНАРЕНКО  
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

### **ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОСТОРОВОВОГО ТА РАДІОМЕТРИЧНОГО РОЗРІЗНЕННЯ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ НА ОСНОВІ ЇХ АНАЛІТИЧНИХ СИГНАЛІВ**

*Запропоновано метод покращення просторового та радіометричного розрізнення цифрових зображень дистанційного зондування, зафіксованих у довільній*

кількості спектральних інтервалів проміння – носія видової інформації. Метод базується на використанні аналітичних сигналів, які відповідають функціям розподілу яскравості зображень окремих спектральних каналів, що фіксуються. Показано, що спряжені за Гільбертом складові аналітичних сигналів, ортогональні функціям розподілу яскравості зафіксованих зображень спектральних каналів, мають розширений діапазон розподілів рівнів яскравості. На основі аналізу аналітичних сигналів, що подають розподіли яскравості цифрових зображень, зафіксованих у різних спектральних каналах, запропоновано спосіб включення до розподілів яскравості зображень цих каналів складових з більш високою, ніж вихідна, лінійною розрізнявальною здатністю при збереженні спектральної інформації. Реалізація запропонованого методу включає наступні етапи: попарну ортогоналізацію розподілів яскравості зображень спектральних каналів; визначення аналітичних сигналів для кожної ортогоналізованої спектральної компоненти зафіксованого багатоспектрального зображення; заміну спряжених за Гільбертом складових аналітичних сигналів зображень спектральних компонент відповідною складовою зображення спектрального каналу з максимальним просторовим розрізненням. Реконструкція розподілів яскравості синтезованих запропонованим способом зображень здійснюється послідовним застосуванням оберненого перетворення Гільберта від сформованих спряжених компонент аналітичних сигналів, що подають розподіли яскравості спектральних складових, та перетворення, оберненого стосовно використаного алгоритму ортогоналізації розподілів яскравості зображень спектральних каналів. За кількісну міру просторового розрізнення використана енергетична ентропія розподілів яскравості.

Показано, що запропонований метод забезпечує збереження структурної схожості функцій розподілів яскравості вихідних та синтезованих зображень спектральних каналів.

Ключові слова: багатоспектральне зображення; просторове розрізнення; радіометричне розрізнення; ортогоналізація; аналітичний сигнал; перетворення Гільберта; індекс структурної схожості.

V.M. KORCHYNSKYI, D.M. SVYNARENKO  
Oles Honchar Dnipro National University

### **IMPROVED SPATIAL AND RADIOMETRIC RESOLUTION OF MULTISPECTRAL DIGITAL REMOTE SENSING IMAGES BASED ON THEIR ANALYTICAL SIGNALS**

*Method of increasing the spatial and radiometric resolution of digital images of remote sensing recorded in arbitrary number of spectral intervals of radiation - carrier of video information is proposed. The method is based on the use of analytical signals corresponding to the brightness distribution functions of the fixed spectral channel images. It is shown that Hilbert conjugated components of these analytical signals are orthogonal to functions of brightness distribution of spectral channel images and have extended dynamic range of brightness levels distributions. Based on the analysis of analytical signals representing the brightness distributions of digital images recorded in different spectral channels, a way of incorporating in the distribution of brightness of images of these channels is a component with a higher than the original linear resolution while maintaining spectral information. Implementation of the proposed method includes the following steps: pairwise orthogonalization of brightness distribution functions of fixed spectral channel images; constructing analytical signals for each orthogonalized spectral component of a fixed*

*multispectral image; replacement of Hilbert conjugated components of analytical signals of spectral images components by corresponding component of spectral channel image with maximum spatial resolution. Reconstruction of brightness distributions of synthesized images is carried out by sequential application of reverse Hilbert transform of generated conjugated components of analytical signals and transformation, and transformation inverse to used algorithm of orthogonalization the brightness distributions of images of spectral channels. It is shown that the proposed method ensures preservation of structural similarity of brightness distribution functions of brightness of initial and synthesized images for all fixed spectral channels. Energy entropy of brightness distributions is used as a quantitative measure of their spatial resolution.*

*Efficiency of proposed method is confirmed by comparative analysis of information entropies of initial and synthesized images of spectral channels.*

*Keywords: multispectral image; spatial resolution; radiometric resolution; orthogonalization; analytical signal; Hilbert transform; index of structural similarity.*

### **Постановка проблемы**

Цель тематического анализа цифровых изображений, формируемых средствами дистанционного зондирования, состоит в определении физического состояния визуализированных на них материальных объектов, представлениями которых являются распределения их собственной яркости. Отметим, что для повышения информативности формируемых видовых данных фиксация изображений производится в ряде спектральных интервалов излучения – носителя видовой информации (многоспектральные цифровые изображения, далее МСИ). Важнейшими характеристиками таких изображений являются их пространственная и радиометрическая разрешающие способности (соответственно минимальный различимый линейный размер визуализированного объекта и разброс уровней яркости его изображения). Вопросам анализа и обработки цифровых изображений посвящено значительное количество работ как теоретического, так и прикладного характера. Соответствующие результаты ориентированы главным образом на повышение визуального качества таких изображений, опосредовано связанного с проблемой повышения их пространственной и радиометрической разрешающих способностей.

В связи с этим актуальна проблема повышения информационной значимости МСИ дистанционного зондирования для их тематического анализа и дешифрирования посредством увеличения пространственного и радиометрического разрешения при сохранении спектральных характеристик.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

В настоящее время наиболее распространены методы увеличения информативности МСИ, базирующиеся на пирамидальных методах их предварительной обработки и сводящиеся к объединению в одном геометрическом объекте распределений яркости изображений нескольких спектральных каналов с различными пространственными разрешениями (концепция Data Fusion) [1–2]. Наиболее существенные результаты получены на основе вейвлет-технологий обработки двумерных цифровых сигналов [3–6], заключающихся в совмещении разномасштабных первичных данных. В прикладном плане результат такого совмещения сводится к увеличению контрастности синтезированных изображений и вследствие этого повышению различимости дискретизированных распределений яркости первичных сигналов. Количественные оценки разрешения полученных указанным способом изображений не производились. Динамический диапазон уровней яркости, а,

следовательно, и радиометрическое разрешение синтезированных изображений при этом не изменяются

Среди иных методов увеличения информативности многоспектральных видовых данных в аспекте их интерпретации и тематического анализа, отметим технологии субпиксельной обработки [7, 8] применительно к изображениям отдельных спектральных каналов МСИ (т.е. без их интерпретации как элементов единого геометрического объекта). Реализация этих методов требует перемасштабирования либо передискретизации первичных изображений и сопровождается неустранимой ошибкой интерполяции.

### Цель исследования

Цель статьи – разработка метода увеличения пространственного и радиометрического разрешения многоспектральных цифровых изображений на основе разделения пространственных частот их составляющих, зафиксированных в различных спектральных диапазонах излучения - носителя видовой информации.

### Изложение основного материала исследования

Реализация предлагаемого метода включает ряд этапов.

Первый этап состоит в ортогонализации функций распределений яркости изображений спектральных каналов цифрового МСИ с целью их декорреляции и реализуется следующим образом.

Представим множество уровней яркости МСИ двумерным массивом  $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$ , где  $n$ ,  $m$  – размерности раstra многоспектрального изображения,  $k$  – количество его спектральных каналов; каждый столбец  $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$  сформирован посредством упорядочения кодов яркости изображения  $k$ -го спектрального канала по строкам/столбцам. Далее рассматриваем массив  $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$  как конкатенацию по столбцам  $k$  векторов:  $\mathbf{G}_{n \times m \times k} = [\mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(1)}, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(2)}, \dots, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(r)}, \dots, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(k)}]$ . Ортогонализацию столбцов массива  $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$  выполним посредством его QR-декомпозиции:

$$\mathbf{G}_{n \times m \times k} = \mathbf{Q}_{n \times m \times k} \cdot \mathbf{R}_{k \times k}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$  – матрица с ортогональными столбцами,  $\mathbf{R}_{k \times k}$  – верхнетреугольная матрица.

Следующий шаг предлагаемого метода состоит в определении аналитических сигналов, соответствующих столбцам матрицы  $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$ :  $\mathbf{A}_{n \times m \times k} = \mathbf{Q}_{n \times m \times k} + \sqrt{-1} \cdot \mathbf{H}_{n \times m \times k}$ , где  $\mathbf{H}_{n \times m \times k}$  – матрица, столбцы которой содержат преобразования Гильберта столбцов матрицы  $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$  (сопряженные по Гильберту составляющие аналитических сигналов). Смысл использования аналитических сигналов определяет двумя обстоятельствами, следующими из свойств дискретного преобразования Гильберта: 1) матрицы  $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$  и  $\mathbf{H}_{n \times m \times k}$  имеют попарно ортогональные столбцы, т.е. независимы друг от друга; 2) динамический диапазон (разброс) значений столбцов  $\mathbf{H}_{n \times m \times k}$  превышает динамический диапазон одноименных столбцов матрицы  $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$ , что следует из спектрального определения преобразования Гильберта как свертки исходного сигнала и преобразования Фурье от знаковой функции в частотной области [9–10].

Заключительным этапом процедуры повышения пространственного и радиометрического разрешения многоспектральных изображений является замена

сопряженных по Гильберту составляющих аналитических сигналов изображений спектральных компонент с номерами  $s = \overline{1, k}$  соответствующей составляющей изображения спектрального канала  $r$  с максимальным радиометрическим разрешением,  $\overline{\mathbf{H}}_{n-m,s} = \mathbf{H}_{n-m,r}$  ( $s \neq r$ ), и формированием модифицированной матрицы аналитических сигналов

$$\overline{\mathbf{A}}_{n-m \times k} = \mathbf{Q}_{n-m \times k} + \sqrt{-1} \cdot \overline{\mathbf{H}}_{n-m \times k}. \quad (2)$$

Собственно реконструкция синтезированных распределений яркости выполняется последовательным применением преобразований, обратных к преобразованиям (2) и (1).

Ниже приведены результаты тестирования предлагаемого метода применительно к многоспектральным изображениям земной поверхности, сформированным сканером Aster с космического аппарата Terra.

На рис. 1–3 представлены первичные растровые изображения трех спектральных каналов многоспектрального цифрового изображения с существенно различными пространственными и радиометрическими разрешениями.



Рис.1. Изображение спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм.



Рис.2. Изображение спектрального канала 1.60 мкм – 1.70 мкм.

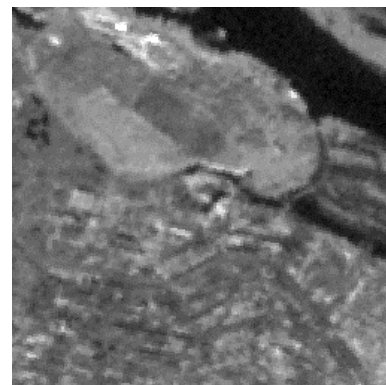


Рис.3. Изображение спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

Как известно, пространственная разрешающая способность уменьшается с увеличением длины волны излучения – носителя видовой информации [3]. В качестве количественной меры пространственного разрешения цифровых изображений примем энергетическую энтропию их распределений яркости [11], значения которой для приведенных изображений представлены в таблице 1.

Таблица 1

Энергетическая энтропия, бит	Изображения		
	Рис.1	Рис.2	Рис.3
	5.3014	4.8102	4.7334

Значения динамических диапазонов уровней яркости приведенных изображений, являющиеся мерой их радиометрического разрешения, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Динамический диапазон уровней яркости	Изображения		
	Рис.1	Рис.2	Рис.3
	254	238	243

Изображения сопряженных по Гильберту компонент соответствующих аналитических сигналов приведены на рис. 4–6.

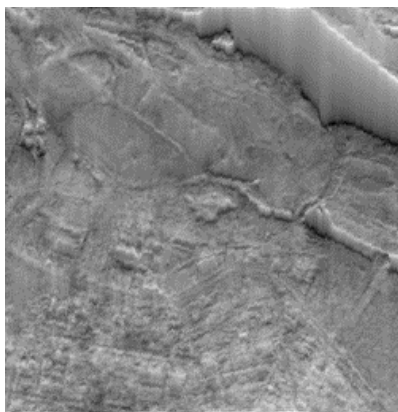


Рис. 4. Сопряженная компонента канала 0.52 мкм – 0.60 мкм.



Рис. 5. Сопряженная компонента канала 1.60 мкм – 1.70 мкм.

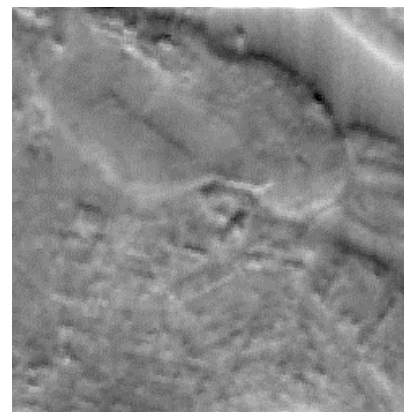


Рис. 6. Сопряженная компонента канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

На рис. 7, 8 представлены изображения спектральных каналов 1.60 мкм – 1.70 мкм и 2.235 мкм – 2.286 мкм, синтезированные предложенным методом.



Рис. 7. Трансформированное изображение канала 1.60 мкм – 1.70 мкм.



Рис. 8. Трансформированное изображение канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

Сравнение изображений, представленных на рис. 2, 3 и на рис. 7, 8 свидетельствует о существенном повышении пространственного и радиометрического разрешения последних, о чем свидетельствуют и данные таблицы 3, в которой представлены соответствующие значения энергетических энтропий и динамических диапазонов уровней яркости

Таблица 3

Параметр	Изображения	
	Рис. 7	Рис.8
Энергетическая энтропия, бит	4.9215	4.8776
Динамический диапазон уровней яркости	248	253

Для анализа структурной схожести распределений яркости первичных МСИ и изображений, синтезированных предложенным методом, используем индексы и карты структурной схожести, построенные по методике, предложенной в работе [12].

В таблице 4 приведены индексы структурной схожести между парами изображений, приведенных на рис. 2, 3 и соответствующими синтезированными изображениями (рис. 7, 8).

Таблица 4

Индекс структурной схожести	Изображения			
	Рис. 2	Рис. 7	Рис. 3	Рис. 8
	0.8527		0.8924	

Данные таблицы свидетельствуют о высоком уровне схожести этих изображений. Отметим возрастание индексов структурной схожести с уменьшением информативности (пространственной разрешающей способности).

На рис. 9, 10 представлены карты структурной схожести наименее информативных исходных изображений, приведенных на рис. 2, 3 и соответствующих синтезированных изображений (рис. 7, 8), представляющие распределения локальных значений индекса структурной схожести по полю изображения (уровни потемнения отображают степени схожести соответственных геометрических объектов).

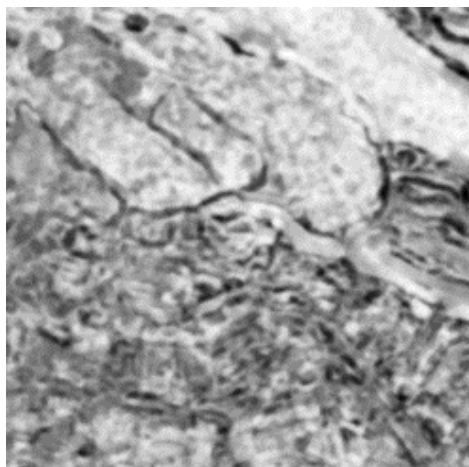


Рис. 9. Карта структурной схожести изображения спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм и его синтезированного изображения.

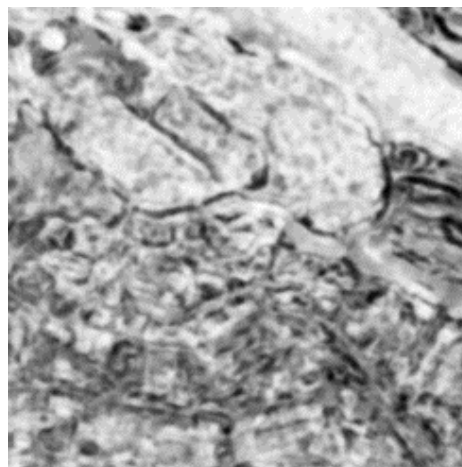


Рис. 10. Карта структурной схожести изображения спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм и его синтезированного изображения.

Как и данные таблицы 3, приведенные карты свидетельствуют о сохранении информации о геометрических формах объектов, представленных на первичных и синтезированных изображениях.

### Выводы

В работе предложен новый метод представления и анализа многоспектральных изображений дистанционного зондирования. Метод обеспечивает совмещение отдельных реализаций таких сигналов в едином объекте с повышенными характеристиками информационной значимости, включая пространственное и радиометрическое разрешения при сохранении спектральной информации и высокой степени структурной схожести исходных и синтезированных изображений.

### Список использованной литературы

1. Mahler R. Optimal/Robust Distributed Data Fusion: a Unified Approach. *Proceedings of SPIE* (USA, Orlando, April 24-26, 2000). Vol. 4052: Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition. №. 4. P. 128–138.
2. Wang Z. J., Ziou D., Armenakis C. A. Comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. № 43(6). P. 1391–1402. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846874.
3. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 556 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
5. Волошин В. И., Корчинский В. М. Повышение информативности видовых данных дистанционного зондирования Земли. *Космічна наука і технологія*. 2006. Т. 12, № 5/6. С. 15–16.
6. Voloshin V. I., Korchinsky V. M., Kharitonov M. M. A Novel Method For Correction of Distortions and Improvement of Information Content in Sattelite-Acquired Multispectral Images. *Advances and Challengers in Multisensor Data and Information Processing*, 2007. P. 315–323.
7. Sangeetha M., Senthilrajan H. Super Resolution. A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2016 Vol. 4, № 21. P. 1–5.
8. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. М.: ДОДЭКА-XXI. 2012. 720 с.
9. Вайнштейн Л. А., Вакман Д. Е. Разделение частот в теории колебаний и волн: монография. М.: Наука, 1983. 288 с.
10. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уодша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях: монография. М: Наука, 1989. 496 с.
11. Габидулин Э. М., Пилипчук Н. И. Лекции по теории информации. М.: МИФИ, 2007. 214 с.
12. Wang Z., Bovik A. K., Sheikh H. R., Simoncelli E. R. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004. Vol. 13. № 4. P. 600–612.

### References

1. Mahler, R. (2000). Optimal/Robust Distributed Data Fusion: a Unified Approach. *Proceedings of SPIE* (USA, Orlando, April 24-26, 2000). Vol. 4052: Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition. №. 4, pp. 128–138.
2. Wang, Z. J., Ziou, D., & Armenakis, C. A. (2005). Comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **43**(6), 1391–1402. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846874.
3. Shovengerdt, R. A. (2010). Distantionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy. M.: Tehnosfera.
4. Gonsales, R., & Vuds, R. (2005). Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. M.: Tehnosfera.
5. Voloshin, V. I., & Korchinsky, V. M. (2006). Povyishenie informativnosti vidovyih danniyh distantionnogo zondirvaniya Zemli. *Kosmichna nauka i tehnologia*. **12**, 5/6, 15–16.
6. Voloshin, V. I., Korchinsky, V. M., & Kharitonov, M. M. (2017). A Novel Method For Correction of Distortions and Improvement of Information Content in Sattelite-Acquired Multispectral Images. *Advances and Challengers in Multisensor Data and Information Processing*. P. 315–323.



7. Sangeetha, M., & Senthilrajan, H. (2016). Super Resolution. A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*. **4**, 21, 1–5.
8. Smit, S. Tsifrovaya obrabotka signalov. (2012). Prakticheskoe rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchnyih rabotnikov. M.: DODEKA-XXI.
9. Vaynshteyn, L. A., Vakman, D. E. (1983). Razdelenie chastot v teorii kolebaniy i voln: monografiya. M.: Nauka.
10. Zalmanzon, L. A. (1989). Preobrazovaniya Fure, Uodsha, Naara i ih primeneniye v upravlenii, svyazi i drugih oblastiakh: monografiya. M: Nauka.
11. Gabidulin, E. M., Pilipchuk, N. I. (2007). Lektsii po teorii informatsii. M.: MIFI.
12. Wang, Z., Bovik, A. K., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. R. (2004). Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. **13**, 4, 600–612.

Корчинский Владимир Михайлович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем и сетей Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, e-mail: korchins50k@i.ua, ORCID: 0000-0001-6621-0631.

Свинаренко Дмитрий Николаевич – к.т.н., доцент, проректор по научно-педагогической работе Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, профессор кафедры телекоммуникационных систем и сетей Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, e-mail: svynarenko\_dnu@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3179-9129.